

УДК 550.34.038.8

АППАРАТУРНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СВЕРХМАЛЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

© 2014 А.С. Черепанцев

Южный федеральный университет, Таганрог, 347929; e-mail: s6319a@mail.ru

В работе рассмотрена возможность регистрации сейсмического излучения в широкой полосе частот, включающей как высокочастотный диапазон регистрации микросейсмических событий, так и традиционный диапазон частот региональной сейсмической сети. Проведен анализ чувствительности имеющихся систем наблюдений в диапазоне частот 0.01-100 Гц и обоснован выбор типа приемника – акселерометра, позволяющего удовлетворить требованиям к частотной характеристике и необходимой чувствительности. Предложен тип широкополосного преобразователя, имеющий требуемые параметры. Рассмотрены особенности его построения.

Ключевые слова: акселерометр, сейсмический шум, пьезоэлектрический преобразователь изгибного типа.

ВВЕДЕНИЕ

Задача метрологического обеспечения контроля потока сейсмических событий (землетрясений и подземных взрывов) остается в настоящее время основной для сейсмологии. Вместе с тем потребности в регистрации колебаний природных и техногенных объектов постоянно расширяются. Необходимость оценки параметров сейсмических событий, их пространственного расположения, характеристик очага, энергии и времени, определяет постановку комплексной регистрации разнесенными системами – сетевыми наблюдениями. Сформировавшаяся иерархия сетей наблюдения – глобальная, национальная, региональная и местная, отражают как природу сейсмического процесса – чрезвычайно широкий диапазон энергий землетрясений от планетарных, до микротресков, регистрируемых специальной высокочувствительной аппаратурой, так и различные специальные задачи, решаемые каждой сетью. Созданные аппаратурные системы наблюдений также отражают данную иерархию, отличаясь частотными диапазонами, чувствительностью, режимами передачи данных и регистрации. При этом общей тенденцией развития сетей, по-видимому, является повышение представительности регистрируемых сейсмических событий, что связано как с увеличением плотности сети, так и улучшением характеристик

используемых систем регистрации. В этой связи актуальной является задача расширения частотной полосы надежной регистрации слабых сейсмических событий и соответственно разработка аппаратуры для этого.

Современные задачи наблюдения естественного сейсмического поля не ограничиваются регистрацией землетрясений. Все больший интерес привлекают непрерывные фоновые колебания Земли, которые исходно определялись как сейсмический шум, являющийся помехой при регистрации сейсмических сигналов от землетрясений. Некоторыми авторами (Рыкунов и др., 1979; Соболев и др., 2005) в сейсмическом шуме выделены закономерности, указывающие на существование в нем информативной компоненты о напряженном состоянии среды. Данная информация может оказаться актуальной для прогноза возможных сильных землетрясений (Салтыков, Кугаенко, 2000). Регистрация подобных фоновых процессов сопряжена с трудностями аппаратурно-методического характера, связанными, как с необходимостью организации наблюдений в наиболее «тихих» точках с минимальным уровнем внешних помех (прежде всего техногенных и метеорологических), так и использованием сверхчувствительной аппаратуры. Имеющиеся в настоящее время широкополосные системы регистрации обладают либо недостаточной чувствительностью, либо рабо-

тают в частотном диапазоне значительных внешних помех (1-10 сек). Разработанные системы повышенной чувствительности (Рыкунов и др., 1978; Смирнов и др., 1990), позволяющие надежно регистрировать фоновый сейсмический процесс, имеют недостаток регистрацию в узкой частотной полосе.

В связи с этим представляется актуальным проведение анализа возможности построения широкополосного датчика регистрации сверхмалых колебаний поверхности с целью регистрации сейсмичности и шумового процесса в широкой полосе частот 0.05-100 Гц.

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В ШИРОКОМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ

Расширение рабочей полосы частот сейсмометрической аппаратуры определяет и расширение диапазона регистрируемых сейсмических событий. С целью определения возможности регистрации землетрясений различной энергии, рассмотрим оценки соотношений частотного диапазона и энергий регистрируемых при этом сейсмических событий.

В качестве частотного параметра землетрясения выбрана угловая частота f_0 спектра смещений в дальней зоне

$$\left(R \gg \frac{2L^2}{\lambda} \right)$$

(Аки, Ричардс, 1983). Частота f_0 является функцией параметра источника и связана с линейным размером L очага землетрясения (Вгупе, 1970). Исходя из модели подобия сейсмических спектров (Аки, 1967), для сейсмического момента M_0 справедливо соотношение:

$$M_0 = C_1 \cdot L^3 = C_2 / f_0^3, \quad (1)$$

где: C_1, C_2 - константы.

С учетом связи между энергетическим классом землетрясения K и M_0 , соотношение (1) позволяет по оценке C_2 для спектра выбранной записи отдельного землетрясения построить частотную зависимость K от угловой частоты f_0 .

Сравнительный анализ данных наблюдений сейсмичности в широком диапазоне магнитуд (Капатори, Ривера, 2004) указывает на справедливость более общего представления

$$M_0 = \tilde{C}_2 \cdot f_0^{-(3+\varepsilon)}, \quad \varepsilon \leq 1, \quad (2)$$

где: \tilde{C}_2, ε - константы.

Зависимость (2) указывает, что величина $\Delta\sigma \cdot v^3$, где $\Delta\sigma$ - сброс напряжений, v - скорость движения по разлому, не является масштабно независимой и определяется магнитудой события. Приведенные в работе (Капатори,

Ривера, 2004) данные указывают, что зависимости в двух предельных случаях при $\varepsilon = 0$ и при $\varepsilon = 1$ пересекаются для значений $M_0 = 10^9$ Н·м и $f_0 = 200$ Гц. Константа в (2), соответствующая данной точке, имеет оценку $\tilde{C}_2 \approx 8 \cdot 10^5$.

С учетом соотношения $E_s = \frac{\Delta\sigma}{2\mu} M_0$, при $\Delta\sigma = 3 \cdot 10^6$ Па, $\mu = 3 \cdot 10^{10}$ Па:

$$K = 11.6 - 3 \cdot \lg f_0, \quad \text{при } \varepsilon = 0,$$

$$K = 9.3 - 2 \cdot \lg f_0, \quad \text{при } \varepsilon = 1,$$

где: E_s - энергия землетрясения, μ - модуль сдвига, K - энергетический класс землетрясения. Представленные на рис. 1 зависимости дают возможность оценить необходимую полосу частот приемника для регистрации сейсмических событий в заданном диапазоне энергий.

Дислокационные модели с различным поведением скорости движения по разрыву с учетом подобия характеристик очага для различных магнитуд (Аки, 1967) позволяют описать плотность амплитудного спектра смещений в дальней зоне соотношениями вида:

$$|A(f)| = \frac{A_0/f_0^3}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2} \quad \text{для модели "f}^{-2}\text{"}, \quad (3)$$

$$|A(f)| = \frac{A_1/f_0^3}{\left(1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2\right)^{3/2}} \quad \text{для модели "f}^{-3}\text{"}.$$

где: A_0, A_1 - константы, f_0 - угловая частота землетрясения.

Модели (3) можно рассматривать как два предельных случая, задающих границы изменения амплитуд смещения на различных частотах.

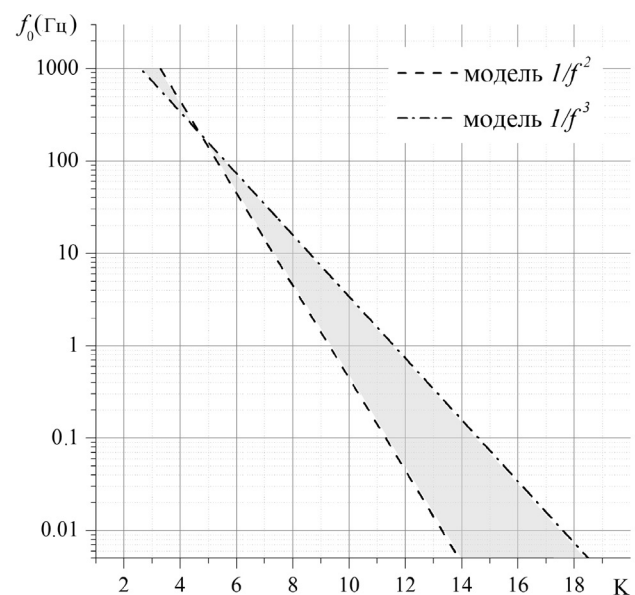


Рис. 1. Зависимость угловой частоты от энергетического класса землетрясения.

Для получения соотношения амплитуд смещений для сейсмических событий различной энергии и, соответственно, с различной угловой частотой, учтем приближение амплитуды в методе стационарной фазы (Аки, 1967), справедливой в дальней зоне для периодов поверхностных волн:

$$x(t)|_{f=f_0} \approx C_3 A(f)|_{f=f_0},$$

где: $x(t)$, $A(f)$ - амплитуды соответственно регистрируемого сигнала и его спектральной компоненты.

Исходя из определения магнитуды землетрясения M_s , справедливого для $M_s \leq 8$:

$$M_s = \lg\left(\frac{X_0}{T}\right) + 1.66 \lg D + 3.5,$$

для амплитуды смещений X_0 поверхности с периодом $T \approx 20$ сек:

$$X_0 = 15.76 \cdot 10^{M_s} \cdot R^{-1.66},$$

где: X_0 - амплитуда смещения (мкм), R - расстояние от приемника до очага (км).

С учетом зависимости магнитуды M_s от размера очага L (км) (Ризниченко, 1985):

$$\lg L = -0.88 + 0.37 M_s,$$

для амплитуды смещения на расстоянии $R = k \cdot L$:

$$X_0 = 4.54 \cdot \frac{10^{0.39 M_s + 2}}{k^{1.66}}. \quad (4)$$

Для оценки связи амплитуды смещений от частоты оценим $M_s(f_0)$ для моделей спектра с квадратичным и кубическим спадом по частоте. Оценки соответствующих зависимостей (Аки, 1967):

$$M_s = 3.6 - 2 \cdot \lg f_0, \quad (5)$$

$$M_s = 4.3 - 3 \cdot \lg f_0.$$

Тогда для амплитуд записей землетрясений различной энергии, с учетом (4),(5):

$$X_0 = \frac{1.1 \cdot 10^4}{k^{1.66} \cdot f_0^{0.77}} \quad (\text{мкм}) - \text{для модели " } f^{-2} \text{ "}$$

$$X_0 = \frac{2.1 \cdot 10^4}{k^{1.66} \cdot f_0^{1.16}} \quad (\text{мкм}) - \text{для модели " } f^{-3} \text{ "}$$

На рис. 2 представлены зависимости для $k = 1000$.

Следует заметить, что полученные оценки частотной зависимости амплитуд регистрируемых сейсмических событий следует считать оценками сверху, так как не учтены эффекты затухания сейсмической волны при распространении в неоднородной среде.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ РЕГИСТРАЦИИ В ШИРОКОЙ ПОЛОСЕ ЧАСТОТ

Важным прикладным аспектом регистрации сейсмического поля являются непрерывные наблюдения фонового поля сейсмичности в широкой полосе частот. С целью анализа

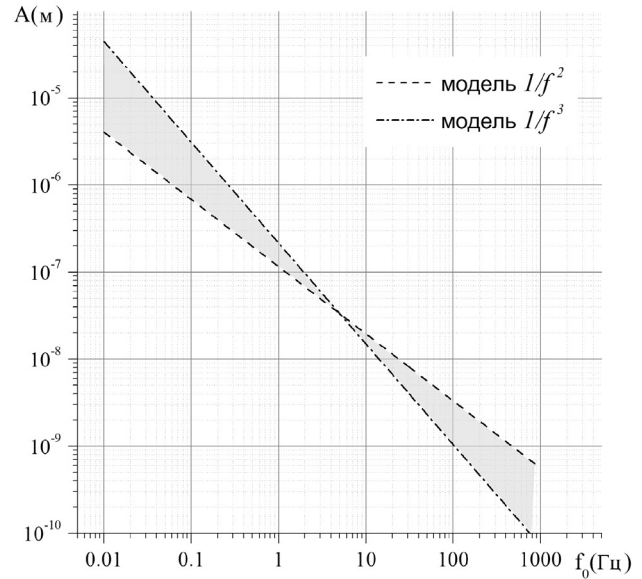


Рис. 2. Зависимость амплитуды смещений от угловой частоты землетрясения в дальней зоне.

возможности решения данной задачи, рассмотрим соотношение спектральной плотности минимальных амплитуд сейсмического шума и предельного уровня регистрируемого сейсмического сигнала применяемыми в настоящее время системами регистрации.

В качестве минимального шумового уровня сейсмического поля выбрана модель нижнего уровня плотности спектра мощности сейсмического шума, полученная американскими геофизиками по оценке шумов мировой сейсмической сети (Peterson, 1993). Для анализа чувствительности аппаратуры регистрации, по которым имеются данные о собственных шумах, выбраны широкополосные системы отечественного и зарубежного производства:

- сейсмометр Lennartz LE-3D/20s (Technical Note..., 2008),
- сейсмометр GURALP CMG-6T (Guralp..., 2001),
- сейсмоприемник CM-3, (Аппаратура..., 1974),
- акселерометр PCB Piezotronics 393B31 (Seismic..., 2009),

Представленные на рис. 3 спектры собственных шумов рассматриваемых систем регистрации дают возможность оценить их частотные и амплитудные диапазоны регистрации сейсмических событий и фоновой сейсмичности.

Анализ диапазонов регистрируемых землетрясений различными приемными системами (таблица) показывает, что параметры широкополосных сейсмометров LE-3D/20s, CMG-6T позволяют регистрировать сейсмические события во всем диапазоне заявляемых рабочих частот, то есть их частотный диапазон соответствует их предельной чувствительности.

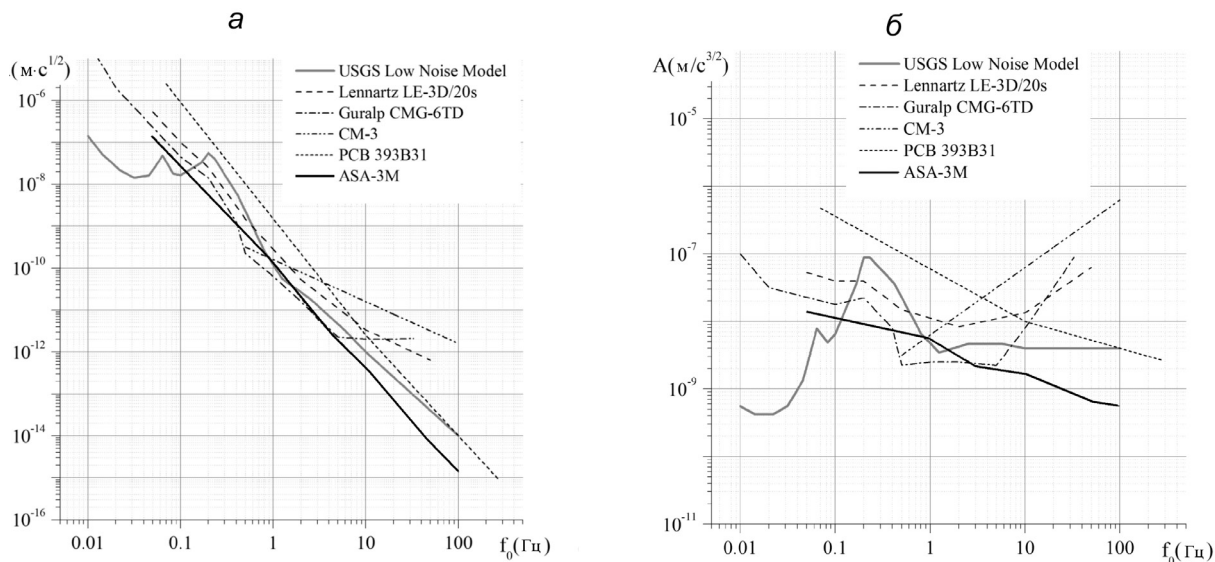


Рис. 3. Плотность спектра мощности смещений (а) и ускорений (б) фонового сейсмического шума (USGS Low Noise Model) и минимальных предельных уровней регистрации широкополосных систем наблюдения. Сплошной черной линией указан предельный уровень собственных шумов низкочастотного акселерометра ASA-3M, описываемого в настоящей работе.

Энергетический класс регистрируемых землетрясений и отношение $g = \frac{A_K}{A_{III}}$ амплитуд сейсмических событий к предельной чувствительности регистрирующей системы на граничных частотах рабочего диапазона.

| | $f_H - f_B$ (Гц) | $K_{min} - K_{max}$ (лгДж) | $g(f_H)$ | $g(f_B)$ |
|-----------|------------------|----------------------------|----------|------------------|
| LE-3D/20s | 0.05-40 | 6.5-14 | 3 | 3700 |
| CMG-6T | 0.033-50 | 6-15 | 2.5 | 1000 |
| CM-3 | 0.5-40 | 6.5-11 | 650 | 500 |
| 393B31 | 0.1-200 | 5-13 | 0,7 | $2.5 \cdot 10^5$ |
| ASA-3M | 0.05-100 | 5.5-14 | 7 | $3 \cdot 10^5$ |

Сейсмометр CM-3 для своего частотного диапазона имеет завышенное значение предельной чувствительности, что может быть использовано и используется при построении систем с расширенным частотным диапазоном путем включения активной обратной связи (сейсмометр CM-3OC).

Предельная чувствительность акселерометра 393B31 на низких частотах является недостаточной для регистрации землетрясений класса $K \geq 11$, имеющих угловую частоту спектра $f_0 \leq 0.1$ Гц и в то же время для слабых сейсмических событий $K = 4.5$ его чувствительность представляется избыточной. По-видимому, данный прибор не является оптимальным для регистрации сейсмичности и более приспособлен для регистрации промышленных вибраций в широком диапазоне частот.

Предлагаемый в данной работе акселерометр ASA-3M демонстрирует достаточную чувствительность для регистрации сейсмичности в рабочей полосе частот, имея избыточно большое разрешение на верхних частотах.

Указанное ранее избыточное разрешение стандартных приемных устройств на верхних частотах для регистрации сейсмических событий оказывается недостаточным при наблюдениях

фоновой сейсмичности. Так для сейсмометра CMG-6T рабочая полоса частот наблюдения фоновой сейсмичности оказывается ограниченной диапазоном 0.5-5 Гц. При этом чувствительностью достаточной для регистрации фонового сейсмического процесса в рабочей полосе частот обладает акселерометр ASA-3M (рис. 3).

Таким образом, задача регистрации нелинейных эффектов, выделенных в сейсмическом шуме на высоких частотах, предполагает построение датчика с чувствительностью выше минимального уровня фоновой сейсмичности ($\sim 2 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}^{3/2}$).

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Для различных задач измерения механических параметров используется тип преобразователя наиболее пригодный для этого. В настоящее время при разработке акселерометров с пьезоэлектрическим преобразователем получили развитие три основных конструктивных направления:

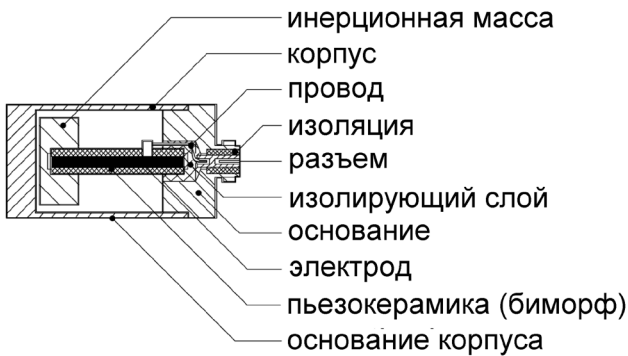


Рис. 4. Конструкция акселерометра с изгибным упругим элементом (Piezoelectric..., 2001).

- системы сдвигового типа;
- системы, работающие на сжатие;
- системы на основе изгибной моды колебаний.

Изгибный тип характеризуется наивысшим значением параметра отношения чувствительности к массе, и именно он используется при построении низкочастотных датчиков повышенной чувствительности (Piezoelectric..., 2004).

В представленной на рис. 4 конструкции в качестве упругой системы рассмотрена модель заделанной пластины с инерционной массой на свободном конце. В низкочастотном приближении форма изгиба пластины может быть представлена выражением (Тимошенко, Гудьер, 1975):

$$y(x) = \frac{1}{2} Y_0 \left(\frac{(L-x)^3}{L^3} - 3 \frac{L-x}{L} + 2 \right),$$

где: L – длина пружины, Y_0 – смещение массы на конце.

Эквивалентная жесткость упругого элемента в этом случае:

$$K = \frac{E_{ю}bh^3}{4L^3}, \quad (6)$$

где: $E_{ю}$ – модуль упругости, b – ширина пластины, h – ее толщина.

Резонансная частота колебательной системы:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi L} \sqrt{\frac{E_{ю}bh^3}{4M \cdot L}}. \quad (7)$$

Коэффициент трансформации в случае если упругий элемент представляет собой биморф (Кл/м):

$$N = \frac{3d_{31}E_{ю}bh}{2L},$$

а чувствительность по ускорению ($B \cdot c^2/m$):

$$\gamma = \frac{M \cdot N}{K \cdot C_{эл} + N^2} = \frac{6 \cdot Md_{31}L}{hb} \cdot \frac{1}{\varepsilon/2 + 9d_{31}^2E_{ю}} \quad (8)$$

где: $C_{эл}$ – электрическая емкость пьезоэлектрического преобразователя, d_{31} – пьезомодуль, ε – диэлектрическая проницаемость.

Для данной модели акселерометра можно выделить ряд особенностей, ограничивающих

эффективность ее использования в качестве низкочастотного датчика ускорений:

1. Как следует из соотношения (8), с уменьшением ε чувствительность растет, но электрическая емкость $C_{эл}$ уменьшается, что требует увеличения входного сопротивления входного электронного каскада. Разработка электронного блока в этом случае представляет собой отдельную сложную и дорогостоящую задачу.

2. Увеличение массы и уменьшение толщины биморфа для повышения чувствительности преобразователя ограничивается возникающими при этом проблемой хрупкости биморфной пластины как к статической деформации, обусловленной силой тяжести при регистрации вертикальных колебаний, так и к динамической ударной нагрузке.

3. Использование высокоомного входного каскада сопровождается повышением уровня собственных электронных шумов, что также снижает чувствительность на низких частотах.

4. Используемая модель изгиба заделанной пластины с инерционной массой на свободном конце характеризуется неоднородным распределением деформации биморфной пластины по длине. Максимум деформации достигается в области жесткого ее крепления к основанию. Это определяет то, что при изгибе работает лишь малая объемная часть преобразователя, что снижает его эффективность. Дополнительный недостаток, связанный с локальным характером области максимальных деформаций, – достижение предела механической прочности в локальной области даже при малых средних деформациях биморфной пластины.

5. Акселерометр описанного типа оказывается чувствительным к вращательному движению основания с горизонтальной осью вращения, ортогональной оси биморфного элемента и движениям с направлениями ортогональными оси чувствительности преобразователя (эффект кросс-каплинга). Указываемое паспортное значение в 10% может оказаться слишком большим при оценке тонких динамических эффектов.

БИМОРФНЫЙ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ИЗГИБНОЙ S-МОДЫ

Рассмотрим возможность улучшения характеристик акселерометра на основе изгибных колебаний биморфного преобразователя.

В отличие от формы изгиба консоли в конструкции акселерометра (рис. 4), при которой эффективно работает малая область биморфа в окрестности точки закрепления с основанием, предлагается использовать форму изгиба S-типа, в которой область деформации расширена.

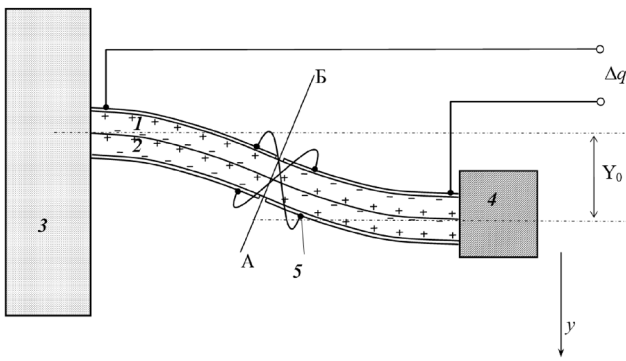


Рис. 5. Схема изгиба S-типа биморфного преобразователя. Биморфный преобразователь представляет собой две пьезокерамические пластины 1, 2, поляризованные в вертикальном направлении с жестким закреплением к основанию 3. Инерционная масса 4 совершает чисто поступательное движение вдоль оси y . Перекоммутиция 5 соответствует параллельному соединению отдельных сегментов биморфа.

Под S-модой изгиба биморфного преобразователя (рис. 5) понимается чистый изгиб закрепленной на концах консоли, не изменяющий длину ее средней линии с выполнением условий для смещения y на концах: $\frac{dy}{dx} = 0$.

Данная форма изгиба определяет для каждой пластины биморфа наличие двух участков деформации противоположного знака. При этом деформация вдоль линии биморфа близка к линейной. Она равна нулю как на плоскости соединения биморфов, так и на ортогональной плоскости, проходящей через центральную линию АБ (рис. 5). Изменение знака деформации вдоль биморфной пластины требует разделения внешних слоев электродов по центральной линии поверхности и перекоммутиции соединения проводящих слоев. Схема параллельного соединения позволяет увеличить коэффициент электромеханической трансформации N при неизменной величине электрической емкости преобразователя.

Кривую изгиба упругого элемента можно определить на основе приближения полиномов с учетом граничных условий

$$y(0) = y(L) = \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_{x=L} = 0$$

и условия симметричности изгиба $y\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{Y_0}{2}$:

$$y(x) = Y_0 \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^2 \left(3 - 2\frac{x}{L}\right).$$

Жесткость упругого элемента при выбранной форме изгиба возрастает в четыре раза по сравнению с формой изгиба, соответствующей свободному нагружению на конце (6):

$$K = \frac{E_{Ю}bh^3}{L^3},$$

увеличивая в два раза резонансную частоту (7):

$$F_0 = \frac{1}{2\pi L} \sqrt{\frac{E_{Ю}bh^3}{M \cdot L}}. \quad (9)$$

При этом коэффициент трансформации для биморфной упругой пластины:

$$N = \frac{3d_{31}E_{Ю}bh}{L},$$

оказывается также выше в два раза. Чувствительность по ускорению преобразователя при использовании колебаний S-моды:

$$\gamma = \frac{M \cdot N}{K \cdot C_{эл} + N^2} = \frac{3 \cdot Md_{31}L}{hb} \cdot \frac{1}{\varepsilon/2 + 9d_{31}^2 E_{Ю}} \quad (10)$$

оказывается в 2 раза меньше, чем у рассмотренной выше модели со свободным подвесом инерционной массы (8), что обусловлено увеличением жесткости системы и ее резонансной частоты.

Из полученных соотношений следует, что:

1. Использование S-моды колебаний биморфа повышает жесткость системы, так как при таком виде изгиба областей максимального изгиба уже две. Они находятся на границе пластины. Эффективность использования рабочей области поверхности пластины как преобразователя при этом повышается.

2. При одной и той же резонансной частоте, что и в системе со свободно нагруженным концом, чувствительность преобразователя с S-изгибной модой колебаний окажется выше в два раза (10) за счет увеличения в 4 раза инерционной массы M .

3. С повышением жесткости упругой системы акселерометра повышается и предельное значение возможных нагрузок.

4. Модель S-изгиба чувствительного элемента может быть реализована путем использования пары изгибных пластин, как представлено на рис. 6. Предлагаемая симметричная конструкция позволяет уменьшить влияние вращательного движения, как при параллельной, так и при последовательной коммутации биморфных преобразователей 4. Именно выбор S-образной формы изгиба биморфного элемента позволяет использовать симметричную упругую систему с компенсацией вращательного движения основания

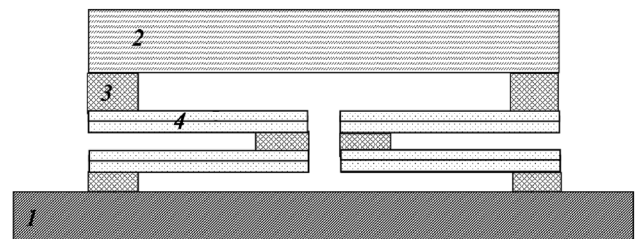


Рис. 6. Модель упругой системы на основе s-изгибной моды колебаний, включающая изгибные пружины на основе пластин биморфных преобразователей 4, инерционную массу 2, жестко связанную с через подложки 3 с пружиной. Край пластин имеет жесткое закрепление с основанием преобразователя 1.

преобразователя. Следует заметить, что использование симметричной системы при форме изгиба, применяемого в модели свободного нагружения инерционной массой, является нереализуемым.

При идентичности электромеханических параметров используемых симметрично включенных биморфных преобразователей, полярность зарядов, обусловленная поступательным вертикальным движением преобразователя, имеет одинаковые знаки. Полярность же зарядов, обусловленная вращательным движением преобразователя относительно оси закрепления биморфов, имеет противоположные знаки. Суммирование сигналов обоих преобразователей приводит к увеличению в 2 раза заряда, обусловленного поступательным движением и компенсацией заряда, обусловленного вращательным движением.

5. Возможность использования нескольких биморфных элементов в преобразователе позволяет оперативно перестраивать характеристики преобразователя при решении задачи повышения чувствительности (последовательное соединение биморфов) или расширения полосы регистрации низких частот за счет увеличения электрической емкости преобразователя (параллельное соединение биморфов).

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ПОВЫШЕННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Особенностью предлагаемой модели изгиба является возможность наращивания изгибных элементов путем их последовательного механического соединения. Получающаяся в этом случае пружина имеет жесткость в k (k – количество соединенных элементов) раз меньше по сравнению с жесткостью отдельной пружины и соответственно в \sqrt{k} раз меньшую резонансную частоту. Путем использования нескольких пружин, дифференциально соединенных с инерционной массой, достигается улучшение характеристик относительной чувствительности к вращениям основания акселерометра и его перемещениям в ортогональных направлениях. Проведем сравнительный анализ достигаемой чувствительности по сравнению с системой, использующей свободные колебания инерционной массы на конце. В случае, если система обладает высокой жесткостью (связанной с решением задачи повышения механической прочности преобразователя), соотношение для чувствительности (8) можно приближенно представить:

$$\gamma \approx \frac{N}{\omega_0^2 \cdot C_{эл}}$$

где: ω_0 – резонансная частота колебательной системы.

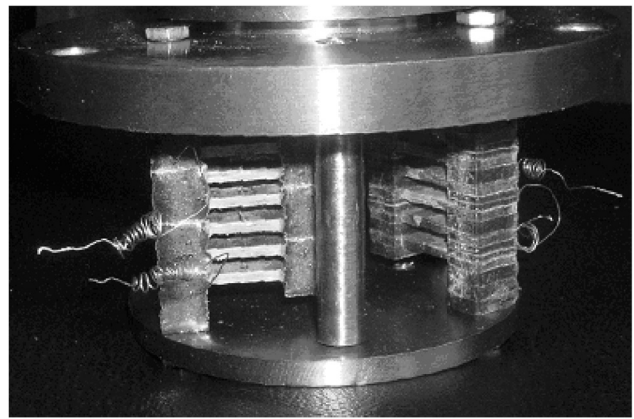


Рис. 7. Система упругих элементов акселерометра ASA-3М.

Исходя из паспортных значений низкочастотного акселерометра PCB Piezotronics 393B31 (Piezoelectric..., 2001), значение собственной частоты: $\omega_0 \geq 2\pi \cdot 700 = 4.4 \cdot 10^3$. Для коэффициента трансформации $N \approx 1 \cdot 10^{-2}$ Кл/м и электрической емкости $C_{эл} \approx 1$ нФ, чувствительность оценивается величиной $\gamma \approx 0,5$ В·с²/м.

Рассмотрим чувствительность акселерометра, с преобразователем S-изгибного типа при увеличении инерционной массы в 4 раза, что определяет равенство резонансных частот (7), (9). Пусть упругая система представляет собой три пружины, каждая из которых состоит из шести биморфных элементов (рис. 7).

Исходя из (8), (10), чувствительность отдельного элемента при S-изгибе оказывается в два раза выше. При последовательном соединении отдельных элементов пружины она дополнительно увеличивается в 3×6 раз, достигая величины $\gamma \approx 18$ В·с²/м. С учетом шумов входного каскада, выполненного на операционном усилителе ОРА 111 (фирма Burr-Brown) с полевыми транзисторами с изолированными затворами на входе и имеющими спектральную плотность шума $u \approx 5.5 \cdot 10^{-9}$ м/с².

Испытания опытного образца акселерометра ASA-3М с описанным преобразователем на основе изгиба S-типа показали, что его чувствительность (рис. 3) позволяет осуществлять регистрацию как сверхслабой сейсмичности и горных ударов, так и фонового сейсмического процесса в широкой полосе частот 0.05-100 Гц.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Использование S-образной формы изгиба биморфного элемента в акселерометре с пьезоэлектрическим преобразователем дает возможность повысить коэффициент преобразования и расширить полосу частот регистрируемых ускорений.

Оценка чувствительности акселерометра на основе S-образной формы изгиба биморфного

элемента является достаточной для решения задачи регистрации непрерывного сейсмического излучения в диапазоне частот 10-300 Гц.

Анализ уровня смещений в дальней зоне для землетрясений в диапазоне энергий $K=4-16$ и оценка чувствительности рассматриваемого акселерометра в диапазоне частот 0.01-300 Гц указывает на возможность его использования для регистрации сейсмических сигналов указанного диапазона энергий.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 11-05-00303-а, РФФИ 14-05-00521.

Список литературы

Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983, Т. 2. 360 с.
 Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР. М.: Наука, 1974. 245 с.
Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.
Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Аппаратура и методы исследования слабых сейсмических эффектов. М.: Деп. ВИНТИ, № 2919-78. 1978. 48 с.
Рыкунов Л.Н., Хаврошкин О.Б., Цыплаков В.В. Временные вариации высокочастотных сейсмических шумов // Известия АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 11. С. 72-77.
Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Сейсмические затихья перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 57-65.
Смирнов В.Б., Черепанцев А.С., Сергеев В.В. Аппаратурно-методические аспекты регистра-

ции высокочастотного шума // Вулканология и сейсмология. 1990. № 2. С. 88-100.
Соболев Г.А., Любушин А.А., Закржевская Н.А. Синхронизация микросейсмических колебаний в минутном диапазоне периодов // Физика Земли. 2005. № 8. С. 3-27.
Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
Aki K. Scaling Law of Seismic Spectrum // JGR. 1967. V. 72. P. 1217-1231.
Brune J. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // JGR. 1970. V. 75. P. 4997-5009.
 Guralp CMG-6T, Guralp catalogue, 2001. <http://www.guralp.com>.
Kanamori H., Rivera L. Static and Dynamic Scaling Relations for Earthquakes and their implications for Rupture Speed and Stress Drop // Bull. Seismol. Soc. Am. 2004. V. 94. №. 1. P. 314-319.
 OPA111 Low Noise Precision Operational Amplifier. Burr-Brown. 2010, Texas Instruments Incorporated. <http://www.ti.com>.
Peterson J. Observations and modeling of seismic background noise // Open-File Report. US Geological Survey, Albuquerque, NM. 1993. P. 93-322.
 Piezoelectric Accelerometers. Theory and Application. Metra Mess- und Frequenztechnik. 2001. <http://www.mmf.de>.
 Seismic Accelerometer, Model 393B31, Specification Sheet, PCB Piezotronics. 2009. <http://www.pcb.com>.
 Technical Note on «Seismometers: general description», 2008, Lennartz Electronic, GmbH, Tübingen, Germany. <http://www.lennartz-electronic.de>.

PECULIARITIES OF METHODS AND INSTRUMENTATION FOR SEISMIC PROCESS REGISTRATION IN A WIDE FREQUENCY BAND

A.S. Cherepantsev

Southern Federal University, Taganrog, 347929

The paper describes the possibility of seismic emission registration in a wide band of frequencies, including both the high frequency range of microseismic events and the traditional frequency range of regional seismic network. The existing observation systems sensitivity in the frequency range of 0.01-100 Hz has been analyzed. The choice of the accelerometer receiver type, which allows satisfying the requirements for frequency response and sensitivity was proven. The author proposes a type of broadband transducer, which possesses the required parameters. The features of its construction were considered.

Keywords: accelerometer, seismic noise, piezoelectric bending transducer type.